中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1500−1507

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160191

黄土高原丘陵沟壑区土壤物理性质对苜蓿种植年限的响应*

罗珠珠[1,2] 牛伊宁[2] 李玲玲[2] 蔡立群[1,2] 张仁陟[2] 谢军红[2]

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070)

摘 要 西部黄土高原丘陵沟壑区是中国乃至世界上水土流失最严重的区域，以禾谷类作物单播为主的传统农业生产系统和过度耕作是引致水土流失的最主要原因。紫花苜蓿作为优良豆科牧草，在区域生态环境建设和产业结构调整中发挥着重要作用。因此，本研究通过设置在陇中黄土高原半干旱区的长期定位试验，以苜蓿草地(3 a、10 a、12 a)和农田(马铃薯地)为主要研究对象，探讨了土壤物理性质对于苜蓿种植年限的响应，为黄土高原雨养农业系统紫花苜蓿适宜种植年限的选择及苜蓿草地的可持续利用提供科学依据。结果表明，随着紫花苜蓿种植年限的加长，土壤表层呈容重降低、孔隙度增加的变化趋势，而下部土层变化不明显。苜蓿种植可以提高耕层 0~30 cm 土壤 0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)，同时降低团聚体破坏率(PAD)，且随种植年限的延长效果愈加明显。苜蓿种植一定年限后土壤总有机碳(TOC)和易氧化有机碳(ROOC)与农田差异明显，其中种植苜蓿土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例为 44%~57%，农田土壤易氧化有机碳比例占 52%~68%，表明种植苜蓿不仅提高了土壤总有机碳含量，且改变了土壤有机碳的组成比例。与农田相比，苜蓿种植可改善土壤水分入渗性能，表现为随种植年限的延长呈现先增加后降低的趋势。黄土高原沟壑区种植苜蓿可以改善土壤有机质形态和物理结构，提高土壤渗透能力，但苜蓿种植年限以 10 a 为宜，10 a 之后应该进行轮作换茬以维持雨养农业系统的可持续发展。
关键词 黄土高原 紫花苜蓿 种植年限 土壤物理性质 水稳性团聚体 土壤有机碳 土壤容重
中图分类号: S152.5; S551+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1500-08

Response of soil physical properties to alfalfa growth years in the Western Loess Plateau*

LUO Zhuzhu[1,2], NIU Yining[2], LI Lingling[2], CAI Liqun[1,2], ZHANG Renzhi[2], XIE Junhong[2]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

Abstract As one of the poorest regions in China, the Loess Plateau has the severe erosion across large areas, which has limited agricultural development beyond subsistence farming. The traditionally cereal-dominant agricultural system driven by extensive tillage and cultivation on slopes has contributed significantly to erosion on the plateau. Alfalfa (*Medicago sativa*) was introduced in China and has since been cultivated for over 2 000 years now. It is one of the important perennial legumes cultivated on the Loess Plateau which increases livestock production, reduces soil erosion in the annual crop rotation system and improves soil fertility through alfalfa-based pasture crop rotation on slopes and annual cropping in upland plains. In a field experiment conducted in Dingxi City, Gansu Province (a typical semiarid area of the West Loess Plateau), different growth

* 国家自然科学基金项目(41461067, 31171513)、国家科技支撑计划项目(2012BAD14B03)和甘肃省财政厅高校基本科研业务费项目(037-041014)资助
罗珠珠，主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: luozz@gsau.edu.cn
收稿日期: 2016−02−28 接受日期: 2016−08−03

* This study supported by the National Natural Science Foundation of China (41461067, 31171513), the National Key Technologies R & D Program of China (2012BAD14B03) and the Fundamental Research Funds of the Finance Department of Gansu Province (037-041014).
Corresponding author, LUO Zhuzhu, E-mail: luozz@gsau.edu.cn
Received Feb. 28, 2016; accepted Aug. 3, 2016

periods of alfalfa were investigated in relation to soil physical properties. The study also discussed the optimum growth years of alfalfa in the Loess Plateau in the central Gansu Province. Soil samples were taken from the 0–50 cm soil layers in alfalfa field plots with different growth years (3 years, 10 years and 12 years) and in potato fields. Measurements of soil bulk density, soil aggregate stability, saturated hydraulic conductivity, total organic carbon (TOC) and readily oxidized organic carbon (ROOC) were then recorded. The results showed that soil bulk density was significantly lower and total porosity significantly higher in potato fields than in alfalfa fields for topsoil, but not significantly different for deep soil layers. The content of > 0.25 mm water-stable macro-aggregates, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates in alfalfa fields increased with alfalfa growth years, and were significantly higher than those in cropland fields for the 0–30 cm soil depth. Then the percentage aggregate destruction (PAD) of soils in alfalfa fields was significant lower than that in potato fields, which decreased with increasing alfalfa growth years. TOC and ROOC improved growth conditions in alfalfa fields for a certain period of growth. The proportion of ROOC to TOC was 44%–57% and 52%–68% in alfalfa fields and in potato fields, respectively. This indicated that alfalfa fields improved soil organic carbon (SOC) content and as well decreased percent ROOC to TOC. SOC was significantly higher in alfalfa fields than in potato fields, where it initially increased and then decreased with increasing alfalfa growth period. Therefore alfalfa cultivation on the plateau was significantly beneficial under rainfed farming system, including the enhancement of soil structure, changes in SOC fraction, and soil permeability. It was, therefore concluded that the optimum growth period of alfalfa in the semi-arid areas of the Loess Plateau was 10 years. It was recommended to develop alfalfa-cereal rotation system after 10 years of alfalfa growth in order to increase crop production, reduce soil erosion and enhance the sustainability of the agricultural system.

Keywords　Loess Plateau; Alfalfa; Growth years; Soil physical property; Water stable aggregate; Soil organic carbon; Soil bulk density

西部黄土高原丘陵沟壑区是中国乃至世界上水土流失最严重的区域。黄绵土质地疏松，抗蚀能力差，雨量少而集中，是造成该区水土流失严重和土地生产力水平低下的主要原因。而该区传统农业对土地的不合理开发利用则是又一主要原因，因为精耕细作使得降水过程中土壤孔隙很容易被细小的土粒堵塞，使雨水入渗速率降低，表土积水形成径流，引发水土流失[1]；另外，禾谷类作物单作的种植系统使得作物生育期以外的休闲期土壤表面长时间裸露，疏松裸露的表土也很容易发生水蚀。近年来，随着对黄土高原水土资源退化和生产力低下问题的广泛认识，退耕还林(草)亦被广泛认可。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)以其高产、优质、富含蛋白质的饲草生产性能和抗旱、耐寒、耐瘠、截流、保土的生态适应性[2]，成为黄土高原丘陵沟壑区退耕还草的首选草种，种植面积亦逐年扩大，并对该区的脆弱生态修复、土壤结构改善、土壤肥力提高起着极为重要的作用[3–4]。

土壤物理性状影响着土壤水肥气热的协调性和土壤中养分、水分的运移，决定着土壤供给植被养分的能力，而土壤团聚体作为土壤基本结构单元，其数量、稳定性常作为土壤稳定性的重要指标[5]，对改善土壤环境具有重要作用，尤其对土壤养分固持以及土壤水分入渗能力的提升发挥着重要的作用。有研究表明[6]，苜蓿作为深根系牧草作物，根系庞大发达，主要分布在耕层20~40 cm，3 a生苜蓿根系可达2 m以上，其对穿透犁底层，增加耕层厚度，改善土壤物理性状，改变土壤结构有重要的作用。其主要表现在根系具有很强的根瘤固氮作用，且其根瘤菌和大量的须根可增加土壤腐殖质和有机质[7]，改善土壤团粒结构[8]，并能增强土壤团粒稳定性。但是，近年来黄土高原苜蓿地土壤方面的相关研究主要集中在土壤水分[9–13]，关于土壤物理性质的研究相对匮乏。而且，不同土地利用方式对土壤物理性质的影响还取决于土地利用方式转变的时间长短。因此，本研究以陇中黄土高原半干旱区位置相毗邻的不同种植年限苜蓿地和农田土壤为研究对象，综合分析探讨土壤物理性质的差异，以期为区域苜蓿草地可持续利用提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

试验设在黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市安定区李家堡镇麻子川村。试区属中温带半干旱区，平均海拔 2 000 m，年均太阳辐射 592.9 $kJ\cdot cm^{-2}$，日照时数 2 476.6 h，年均气温 6.4 ℃，≥0 ℃积温 2 933.5 ℃，≥10 ℃积温 2 239.1 ℃；无霜期 140 d，年均降水量 390.9 mm，年蒸发量 1 531 mm，干燥度 2.53，为典型的雨养农业区。土壤为典型的黄绵土，土质疏松，土层深厚，质地均匀，贮水性能良好。紫花苜蓿是当地的主要牧草，种植面积稳定在 4 万 hm^2 左右。

1.2 试验设计

试验地块处于同一地形部位，具有相同的水热环境与土壤基质。2014年选取种植年限分别为3 a、10 a、12 a紫花苜蓿地和农田(对照)。其中3 a生苜蓿于2012年4月播种，10 a生苜蓿于2005年4月播种，12 a生苜蓿于2003年7月播种；农田为当地主栽作物马铃薯(*Solanum tuberosum*)地。苜蓿品种为当地传统种植品种'陇东苜蓿'，各处理3次重复，小区面积20 m^2。

1.3 测定项目与方法

2014年10月苜蓿第2次刈割后分别采集0~10 cm、10~30 cm和30~50 cm 3个层次的土壤进行各项土壤物理性状测定。

1.3.1 土壤容重和孔隙度

采用S型取样法用环刀分别取0~10 cm、10~30 cm和30~50 cm 3个层次的土样进行土壤容重和孔隙度测定[14]。

1.3.2 土壤团聚体

采用五点法分别用土铲取0~10 cm、10~30 cm和30~50 cm 3个层次的原状土样，采用干筛法和湿筛法[15]获得各级别团聚体的含量，干筛法和湿筛法均通过孔径为5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm和0.25 mm 5个筛级，并计算$R_{0.25}$、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和团聚体破坏率(PAD)。MWD是一种基于土壤结构体分布呈正态分布模型，反映筛分后土壤结构体大小平均状况的数学估计，其与土壤稳定性大团聚体含量密切相关。GMD是一种基于土壤结构体分布呈对数正态分布模型，反映筛分后出现几率最多的土壤结构体大小状况的数学估计。PAD是评价土壤团聚体稳定性的一个重要指标，其值愈大则团聚体愈容易遭到破坏，团聚体稳定性也就愈低。

$$\mathrm{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad (1)$$

$$\mathrm{GMD}=\mathrm{EXP}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right] \quad (2)$$

式中：MWD为团聚体平均重量直径，GMD为团聚体几何平均直径，$\bar{x}_i$为i级团聚体平均直径，w_i为i粒级团聚体重量所占的比例。

$$\mathrm{PAD}=(W_\mathrm{d}-W_\mathrm{w})/W_\mathrm{d} \quad (3)$$

式中：PAD为团聚体破坏率，W_d为干筛>0.25 mm团聚体所占比例，W_w为湿筛>0.25 mm团聚体所占比例。

1.3.3 土壤有机碳

采用S型取样法用土钻分别取0~10 cm、10~30 cm和30~50 cm 3个层次的土样，并剔除石块、植物残根等杂物，装袋带回实验室，风干研磨过1 mm筛。土壤总有机碳(TOC)的测定采用重铬酸钾外加热法[16]；易氧化有机碳(ROOC)的测定采用333 $\mathrm{mmol\cdot L^{-1}}$的高锰酸钾氧化法[17]。

1.3.4 土壤渗透性能

试验田原地采用圆盘渗透仪法[18]测定土壤饱和导水率、土壤渗吸率、宏观毛管长度和有效孔径。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2003和SPSS 18.0软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限苜蓿地土壤容重和孔隙度的变化

与农田相比，种植苜蓿增加了各层的土壤容重，且对表层0~10 cm的影响尤为明显(P<0.05)，对下层则无显著影响(表1)。土壤总孔隙度和毛管孔隙度呈现与土壤容重相反的趋势，在耕层0~30 cm土层表现为农田显著高于种植苜蓿土壤(P<0.05)，下层无显著差异。非毛管孔隙度在表层0~10 cm表现为农田显著低于种植苜蓿土壤(P<0.05)，而表层以下土壤各处理间均无显著差异。总体表现出随着苜蓿种植年限的加长，土壤表层容重呈现降低而孔隙度增加的变化趋势，而下部土层变化不明显，但与农田相比还是增加了土壤容重，降低了孔隙度。

2.2 不同种植年限苜蓿地土壤团聚体稳定性的变化

本研究主要采用>0.25 mm的团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)以及团聚体破坏率(PAD)来评价土壤团聚体的稳定性。与农田相比，苜蓿的种植可显著提高土壤团聚体机械稳定性(P<0.05)，且表现出随着种植年限的延长先增加后降低的趋势(表2)。与干筛法相比，湿筛$R_{0.25}$、GMD和MWD显著低于干筛法的数值，说明黄绵土耕层团聚体稳定性总体较低，很容易在水的作用下泡散，而且被水分散后较大的结构体往往崩解为微团聚体或更小的土壤颗粒。与农田相比，随着苜蓿种植年限的延长，各土层水稳性团聚体含量增加，同时PAD降低，但仅对耕层影响显著，耕层以下无显著差异(P>0.05)。

表 1　不同种植年限苜蓿地的土壤容重和孔隙度

Table 1　Soil bulk density and porosity of alfalfa fields with different growth years

土层 Soil depth (cm)	处理 Treatment	容重 Bulk density (g·cm^{-3})	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔度 Capillary porosity (%)	非毛管孔度 Non-capillary porosity (%)
0~10	12 a	1.30±0.06ab	50.88±2.19ab	46.07±2.05b	4.81±0.84a
	10 a	1.28±0.05ab	51.87±1.77ab	46.66±1.38b	5.21±0.61a
	3 a	1.36±0.07a	48.57±2.54b	44.00±2.35b	4.57±0.67a
	农田 Potato field	1.22±0.02b	53.98±0.77a	51.71±0.74a	2.27±0.18b
10~30	12 a	1.39±0.03a	47.74±1.12a	43.1±0.74b	4.60±0.54a
	10 a	1.35±0.02a	49.09±0.80a	42.77±1.34b	6.32±0.98a
	3 a	1.38±0.03a	48.09±1.02a	43.25±1.05b	4.84±1.46a
	农田 Potato field	1.31±0.03a	50.54±1.00a	46.40±1.11a	4.13±0.53a
30~50	12 a	1.40±0.03a	47.25±1.06a	43.42±0.67a	3.82±0.72a
	10 a	1.37±0.02a	48.16±0.66a	43.20±0.87a	4.96±0.25a
	3 a	1.30±0.05a	51.00±1.87a	46.70±2.72a	4.30±0.85a
	农田 Potato field	1.28±0.11a	51.55±4.05a	47.54±3.96a	4.01±0.11a

12 a、10 a 和 3 a 分别表示种植 12 a、10 a 和 3 a 的紫花苜蓿地。同列不同小写字母表示不同处理在 5%水平上差异显著，下同。12 a, 10 a and 3 a represent alfalfa fields with different growth years (3, 10 and 12 years). Different lowercase letters in the same column represent significant differences at $P < 0.05$ among different treatments (LSD). The same below.

表 2　不同种植年限苜蓿地的土壤团聚体稳定性

Table 2　Soil aggregate stability of alfalfa fields with different growth years

土层 Soil depth (cm)	处理 Treatment	干筛法 Dry sieving			湿筛法 Wet sieving			团聚体破坏率 Percentage of aggregate disruption (%)
		平均重量直径 Mean weight diameter (mm)	几何平均直径 Geometric mean diameter (mm)	>0.25 mm 团聚体含量 Content of aggregates > 0.25 mm (%)	平均重量直径 Mean weight diameter (mm)	几何平均直径 Geometric mean diameter (mm)	>0.25 mm 团聚体含量 Content of aggregates > 0.25 mm (%)	
0~10	12 a	1.67±0.12c	0.74±0.06b	69.90±1.50c	0.31±0.01b	0.14±0.00 a	8.71±0.41a	37.70±1.58d
	10 a	2.10±0.07a	1.02±0.05a	78.15±1.79a	0.33±0.00a	0.15±0.01a	8.20±0.23a	47.50±2.60c
	3 a	2.04±0.04a	0.96±0.05a	74.37±1.22b	0.32±0.01ab	0.14±0.00a	5.05±0.17b	66.08±0.62b
	农田 Potato field	1.81±0.04b	0.79±0.03b	70.03±1.15c	0.28±0.01c	0.13±0.00a	3.91±0.13c	72.11±0.56a
10~30	12 a	2.26±0.11b	1.09±0.08b	77.34±0.88c	0.27±0.01a	0.13±0.00a	2.39±0.51b	84.52±3.38b
	10 a	2.55±0.11a	1.39±0.08a	84.67±0.46a	0.27±0.01a	0.13±0.00a	2.98±0.11a	82.40±0.59b
	3 a	2.38±0.05ab	1.22±0.03b	80.92±1.36b	0.26±0.00a	0.13±0.00a	2.45±0.15ab	84.84±0.95b
	农田 Potato field	2.25±0.08b	1.15±0.05b	80.54±0.56b	0.26±0.00a	0.13±0.00a	1.69±0.17c	89.49±0.98a
30~50	12 a	2.17±0.21c	1.04±0.15c	76.35±3.33b	0.27±0.01a	0.13±0.00a	1.50±0.40a	90.09±3.11a
	10 a	2.41±0.05b	1.26±0.05b	81.63±1.05a	0.26±0.01a	0.13±0.00a	1.35±0.05a	91.75±0.30a
	3 a	2.66±0.04a	1.44±0.03a	83.53±0.95a	0.26±0.00a	0.13±0.00a	1.19±0.10a	92.90±0.59a
	农田 Potato field	2.29±0.08bc	1.08±0.07c	76.36±2.36b	0.26±0.00a	0.13±0.00a	1.40±0.13a	90.84±0.57a

2.3　不同种植年限苜蓿地土壤总有机碳和易氧化有机碳的变化

苜蓿种植一定年限之后可显著提高土壤总有机碳(TOC)和易氧化有机碳含量(ROOC)(表 3)，且呈现随土层深度下降的趋势。其中 TOC 在表层 0~10 cm 表现为 12 a 和 10 a 苜蓿地显著高于农田(P<0.05)，3 a 苜蓿地低于农田但无显著差异。其中 12 a 生苜蓿地比 3 a 生苜蓿地和农田分别提高 45.37%和 35.79%，10 a 生苜蓿地比 3 a 生苜蓿地和农田分别提高 33.36%和 24.57%。表层以下土壤表现为不同种植年限苜蓿地均高于农田，其中 10~30 cm 土层比农田提高 21.06%~65.85%，30~50 cm 土层提高 12.29%~37.91%。土壤 ROOC 表现出与 TOC 基本一致的变化趋势，但苜蓿种植对耕层(0~30 cm)的影响尤为明显(P<0.05)，下层无显著差异。同时，苜蓿种植增加了土壤对碳素的固持，种植苜蓿土壤易氧化有机碳占土壤总有机碳的 44%~57%，农田为 52%~68%，特别是 10~30 cm 土层种植苜蓿土壤与农田的差异达显著水平(P<0.05)。

表 3 不同种植年限苜蓿地土壤的总有机碳和易氧化有机碳
Table 3 Soil total organic carbon and readily oxidized organic carbon of alfalfa fields with different growth years

土层 Soil depth (cm)	处理 Treatment	总有机碳 (TOC) Total organic carbon ($g\cdot kg^{-1}$)	易氧化有机碳(ROOC) Readily oxidized organic carbon ($g\cdot kg^{-1}$)	易氧化有机碳占总有机碳比例 ROOC/TOC (%)
0~10	12 a	11.41±1.40a	5.04±0.22a	44.60±5.59a
	10 a	10.46±1.76a	4.61±0.29ab	44.63±5.41a
	3 a	7.85±0.61b	3.98±0.43b	51.11±8.47a
	农田 Potato field	8.40±0.24b	4.42±0.21ab	52.60±2.65a
10~30	12 a	10.41±2.07a	4.47±0.11a	44.22±10.01b
	10 a	8.22±0.67ab	4.30±0.06ab	52.55±3.69b
	3 a	7.60±0.61b	4.04±0.16c	53.31±2.07b
	农田 Potato field	6.28±0.81b	4.21±0.10bc	67.62±7.79a
30~50	12 a	8.84±1.41a	4.26±0.64a	48.40±5.26a
	10 a	8.55±1.06a	4.10±0.40a	48.80±9.80a
	3 a	7.21±1.20ab	4.05±0.74a	57.28±14.53a
	农田 Potato field	6.41±0.93b	4.08±0.51a	64.04±8.10a

2.4 不同种植年限苜蓿地土壤渗透性能的变化

土壤饱和导水率、渗吸率、宏观毛管长度以及有效孔径是反映土壤管理措施对土壤渗透性能影响的指标。与农田相比，苜蓿种植可改善黄土高原沟壑区土壤渗透性能，其能力与苜蓿的种植年限有关(表4)。其中土壤饱和导水率表现为10 a苜蓿地显著高于农田，但12 a苜蓿地低于农田；土壤渗吸率表现为12 a苜蓿地显著低于农田($P<0.05$)，但10 a和3 a苜蓿地与农田无显著差异；宏观毛管长度表现为农田显著高于种植苜蓿土壤($P<0.05$)，有效孔径则表现为农田低于种植苜蓿土壤。这说明土壤饱和导水率的高低不仅取决于土壤孔隙数量，还和孔隙稳定性关系密切，特别是大孔隙的连通性对土壤水分的入渗起主导作用。

表 4 不同种植年限苜蓿地的土壤渗透性能
Table 4 Soil water infiltration of alfalfa fields with different growth years

处理 Treatment	土壤饱和导水率 Soil saturated hydrolic conductivity ($mm\cdot h^{-1}$)	土壤渗吸率 Soil sorptivity ($mm\cdot min^{-1/2}$)	宏观毛管长度 Macroscopic capillary length (mm)	有效孔径 Mean pore diameter (mm)
12 a	12.80±2.14b	0.32±0.08b	1.42±0.44b	5.59±1.81a
10 a	48.40±9.48a	0.89±0.11a	3.31±0.37b	2.25±0.26b
3 a	21.20±3.70b	0.80±0.18a	4.96±1.65ab	1.64±0.67b
农田 Potato field	21.17±1.02b	0.86±0.14a	9.01±3.46a	0.90±0.30b

3 讨论

土地利用方式的改变会对土壤质量产生重大影响，其中主要表现在土壤有机碳及其组分的衰减和增加[19]。李小涵等[20]和宋丽萍等[21]研究发现，长期苜蓿连作是增加旱地土壤有机碳的一种有效措施，但不同种植年限苜蓿地与休闲地间存在不同的差异，说明土壤有机碳的变化与土壤利用方式及苜蓿种植年限有着密切关系[22]。本研究发现土壤总有机碳和易氧化有机碳在苜蓿建植初始的第3 a甚至低于农田，但随种植年限的延长明显增加，这说明紫花苜蓿对土壤有机碳的提高只有到达一定种植年限之后才明显，且年限越久有机碳含量越高，从这一点看紫花苜蓿种植年限越长对土壤的改良效果越好，这与部继承等[23]的研究结果一致。因为紫花苜蓿生长初期需要消耗大量土壤养分，而这段时期其生理机能很弱，基本不能固氮；随着植株进一步生长发育，其根部共生大量根瘤菌并具备一定的固氮能力，此时虽然植株还在继续吸收土壤中的养分，但同时能将空气中的氮素固定，且根系也会产生一些有机分泌物，再加之部分地下生物死亡腐烂，可以增加土壤中有机碳含量。土壤惰性碳库主要是指黏粒间的碳或者惰性碳，一般占土壤总有机碳的30%~40%，而决定土壤水稳性大团聚体数量的易氧化有机碳比例占60%以上。本文研究表明不同种植年限苜蓿地土壤易氧化有机碳占土壤总有机碳量的44%~57%，农

田土壤易氧化有机碳占土壤总有机碳量的52%~68%左右，可见苜蓿地土壤易氧化有机碳占土壤总有机碳的比例明显低于农田土壤，说明种植苜蓿不仅提高了土壤总有机碳含量，而且改变了土壤有机碳的组成比例，明显增加了土壤碳素的固持。

容重作为土壤的一项基本物理性质，能够综合反映土壤松紧度、孔隙度及水土流失状况，对于在同一母质上发育的地势平坦的土壤，不同土地利用方式是影响土壤容重和孔隙度的重要因素之一[24]。本研究发现随着苜蓿种植年限的延长表层土壤容重呈现降低趋势，而下部土层变化不明显，但与农田相比还是增加了土壤容重，降低了孔隙度。这说明苜蓿连续种植多年之后导致表层土壤紧实；农田土壤虽然经历了人为的耕作干扰，但由于 20~30 cm 土层中犁底层的存在，导致 10 cm 以下土层容重和孔隙度与种植苜蓿土壤并无明显差异。这与 Chan 等[25]的研究有分歧，其认为 25 a 的草地 0~10 cm 土层容重显著低于耕作土壤，同时其>300 μm 孔隙的数量显著高于耕作土壤。这反映出在不同气候条件下，不同草地类型对土壤孔隙性能的影响存在一定差异。本研究同时发现，与农田相比，种植苜蓿避免了机械及人为的扰动，维持了团聚体数量和结构的稳定性，促进土壤结构体的形成，且随种植年限的延长效果愈加明显。国内外相关研究结果与之一致，如 Barber[26]研究发现种植苜蓿可增加土壤水稳性团粒指数，且 4 a 试验期间土壤水稳性团粒指数随其种植年限的延长而增加；陈正发等[27]研究表明，与耕地相比，长期种植紫花苜蓿土壤表现出较好的团聚体稳定性。

土壤物理性质的好坏源于土壤结构，并最终影响到土壤渗透性能。本研究发现，苜蓿种植可改善土壤水分入渗性能，其能力亦与苜蓿的种植年限有关，表现为随种植年限的延长呈先增加后降低的趋势。因为土壤饱和导水率作为反映土壤渗透性能的重要指标，其高低不仅取决于土壤孔隙数量，还与孔隙稳定性关系密切，特别是大孔隙的连通性对土壤水分的入渗起主导作用[28]。种植苜蓿土壤表层凋落物较多有利于土壤中有机质的累积，其作为重要的胶结物质在团聚体形成过程中具有不可替代的作用，且特别有利于大粒径团聚体的形成与稳定，而团粒结构的形成可进一步增加土壤非毛管孔隙的比重，提高土壤水分入渗；而农田表层土壤结构稳定性较低，在流水的作用下会迅速发生坍塌，从而降低孔隙的稳定性和连续性，导致其渗透性能较低。

水分是旱区农业生产的首要限制因素，也是确定苜蓿耕翻轮作年限的关键，故前人研究[29–30]大多依据土壤干化程度选择苜蓿适宜耕翻轮作的年限。本研究从土壤物理性质和耕层土壤水分入渗角度考虑，陇中黄土高原雨养农业系统紫花苜蓿生长和利用的合理年限以10 a左右为宜，当苜蓿生长10 a以后，建议开始轮作换茬，通过实行草田轮作来维持雨养农业系统的可持续发展。

4　结论

本研究发现陇中黄土高原丘陵沟壑区苜蓿种植一定年限之后可显著提高土壤总有机碳和易氧化有机碳含量，且易氧化有机碳占总有机碳的比例表现为种植苜蓿土壤明显低于农田，说明种植苜蓿不仅提高了土壤总有机碳含量，也改变了土壤有机碳的组成比例，更有利于土壤对碳素的固持。黄土高原旱地土壤>0.25 mm 水稳性团聚体含量非常低(不足10%)，但仍然表现为种植苜蓿土壤显著高于农田，说明黄绵土耕层土壤的团聚体稳定性总体较低，极易在水的作用下泡散，而通过长期种植苜蓿可改善土壤结构性能和渗透性能。总体而言，黄土高原丘陵沟壑区种植苜蓿可以改善土壤的有机质形态和物理结构，增加土壤水分入渗，但苜蓿生长和利用的合理年限以 10 a 左右为宜，建议苜蓿种植 10 a 后应进行轮作换茬。

参考文献　References

[1] 李玲玲，黄高宝，张仁陟，等．免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]．水土保持学报, 2005, 19(5): 94–97
Li L L, Huang G B, Zhang R Z, et al. Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 94–97

[2] 孙建华，王彦荣．中国主要苜蓿品种的产量性状及其多样性研究[J]．应用生态学报, 2004, 15(5): 803–808
Sun J H, Wang Y R. Yield characteristics and genetic diversity of main alfalfa varieties in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 803–808

[3] 张少华．陇东黄土高原干旱草地利用方向和途径的探讨[J]．草业科学, 1997, 14(5): 4–7
Zhang S H. Approach to the direction and pathway of arid grassland utilization in loess plateau, east Gansu Province[J]. Pratacultural Science, 1997, 14(5): 4–7

[4] 吴旭东，张晓娟，谢应忠，等．不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]．草业学报, 2013, 22(1): 245–251
Wu X D, Zhang X J, Xie Y Z, et al. Vertical distribution characters of soil organic carbon and soil enzyme activity in alfalfa field with different growing years[J]. Acta Prataculturae

Sinica, 2013, 22(1): 245–251
[5] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 592–600
Hou X Q, Li R, Han Q F, et al. Effects of alternate tillage on soil physicochemical properties and yield of dryland wheat in arid areas of South Ningxia[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 592–600
[6] 王庆锁, 张玉发, 苏加楷, 等. 苜蓿–作物轮作研究[J]. 生态农业研究, 1999, 7(3): 35–38
Wang Q S, Zhang Y F, Su J K. Review on alfalfa-crop rotations[J]. Eco-Agriculture Research, 1999, 7(3): 35–38
[7] Yang X M, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 59(3/4): 107–114
[8] Whitbread A M, Blair C J, Lefroy R D B. Managing legume 1eys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia: 2. Soil physical fertility and carbon[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 54(1/2): 77–89
[9] Shen Y Y, Li L L, Chen W, et al. Soil water, soil nitrogen and productivity of lucerne-wheat sequences on deep silt loams in a summer dominant rainfall environment[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 97–108
[10] Li L L, Huang G B, Zhang R Z, et al. Effects of lucerne removal time on soil water and productivity in a lucerne-wheat rotation on the western Loess Plateau[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(4): 686–693
[11] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 75–89
Li J, Chen B, Li X F, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75–89
[12] 罗珠珠, 牛伊宁, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 31–38
Luo Z Z, Niu Y N, Li L L, et al. Soil moisture and alfalfa productivity response from different years of growth on the Loess Plateau of central Gansu[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(1): 31–38
[13] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿地土壤干燥化特征及适宜种植年限[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3059–3065
Luo Z Z, Li L L, Niu Y N, et al. Soil dryness characteristics of alfalfa cropland and optimal growth years of alfalfa on the Loess Plateau of central Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3059–3065
[14] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 66–77
Laboratory of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical Properties Measurement[M]. Beijing: Science Press, 1978: 66–77
[15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 514–518
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 514–518
[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30–38
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 30–38
[17] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155–156(1): 399–402
[18] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 54–58
Xu M X, Liu G B, Bu C F, et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 54–58
[19] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(3): 345–353
[20] 李小涵, 王朝辉, 郝明德, 等. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 325–330
Li X H, Wang Z H, Hao M D, et al. Evaluation on soil carbon contents under different cropping systems on dryland in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S2): 325–330
[21] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 苜蓿–作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 27–35
Song L P, Luo Z Z, Li L L, et al. Effects of lucerne-crop rotation patterns on soil aggregate stability and soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 27–35
[22] 王振, 王子煜, 韩清芳, 等. 黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1073–1079
Wang Z, Wang Z Y, Han Q F, et al. Soil carbon and nitrogen variation characteristics of alfalfa grassland in Loess Plateau area[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(6): 1073–1079
[23] 邰继承, 杨恒山, 张庆国, 等. 种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 603–607
Tai J C, Yang H S, Zhang Q G, et al. Influence of planting years on nitrogen-fixing capacity of rhizosphere and contents of carbon and nitrogen in artificial pastures of alfalfa[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 603–607
[24] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4695–4704
Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4695–4704
[25] Chan K Y, Mead J A. Surface physical properties of a sandy loam soil under different tillage practices[J]. Australian Journal of Soil Research, 1988, 26(3): 549–559
[26] Barber S A. The influence of alfalfa, bromegrass, and corn on soil aggregation and crop yield[J]. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(4): 258–259

[27] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721–2729
Chen Z F, Shi D M, Xie J Q, et al. Aggregate stability of purple soil and its impacts on soil erosion of slope dry land[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(13): 2721–2729
[28] 吴继强, 张建丰, 高瑞. 大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 13–18
Wu J Q, Zhang J F, Gao R. Physical simulation experiments of effects of macropores on soil water infiltration characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 13–18
[29] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404–411
Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(3): 404–411
[30] 王美艳, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4526–4534
Wang M Y, Li J, Sun J, et al. Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4526–4534